

杉木人工林生物量估算模型的选择*

李 燕 张建国** 段爱国 相聪伟

(中国林业科学研究院林业研究所国家林业局森林培育重点实验室, 北京 100091)

摘 要 采用 11 种形式的生物量模型, 分别对杉木幼龄林(7 年生)、中龄林(16 年生)、成熟林(28 年生)和不分林龄的单木各器官和全株生物量进行拟合, 共得到生物量估算模型 308 个. 结果表明: 11 种生物量模型均能较好地模拟杉木单木生物量, 其中幂函数模型的拟合效果最优, 其次为指数模型, 然后为多项式模型; 共选出估算杉木幼龄林、中龄林和成熟林各器官和全株生物量的最优模型 21 个(包括 18 个器官模型、3 个全株模型), 不分林龄的杉木单木各生物量的最优模型 7 个(包括 6 个器官模型、1 个全株模型), 均为幂函数模型; 不同林龄的杉木单木生物量最优模型的通用性较差, 而不分龄林的杉木单木生物量最优模型具有一定的通用性, 精度较高, 可用于估算不同林龄的杉木单木生物量. 应用福建邵武杉木单木生物量模型对江西 28 年生的杉木成熟林单木各生物量的预测结果显示, 不分林龄的大样本生物量模型精度较高, 可在较大范围内应用, 而区域小样本模型仅限于在区域小范围内应用.

关键词 杉木人工林 生物量 估算模型

文章编号 1001-9332(2010)12-3036-11 **中图分类号** Q948.12; S718.55 **文献标识码** A

Selection of biomass estimation models for Chinese fir plantation. LI Yan, ZHANG Jian-guo, DUAN Ai-guo, XIANG Cong-wei (State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Silviculture, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(12): 3036–3046.

Abstract: A total of 11 kinds of biomass models were adopted to estimate the biomass of single tree and its organs in young (7-year old), middle-age (16-year old), mature (28-year old), and mixed-age Chinese fir plantations. There were totally 308 biomass models fitted. Among the 11 kinds of biomass models, power function models fitted best, followed by exponential models, and then polynomial models. Twenty-one optimal biomass models for individual organ and single tree were chosen, including 18 models for individual organ and 3 models for single tree. There were 7 optimal biomass models for the single tree in the mixed-age plantation, containing 6 for individual organ and 1 for single tree, and all in the form of power function. The optimal biomass models for the single tree in different age plantations had poor generality, but the ones for that in mixed-age plantation had a certain generality with high accuracy, which could be used for estimating the biomass of single tree in different age plantations. The optimal biomass models for single Chinese fir tree in Shaowu of Fujian Province were used to predict the single tree biomass in mature (28-year old) Chinese fir plantation in Jiangxi Province, and it was found that the models based on a large sample of forest biomass had a relatively high accuracy, being able to be applied in large area, whereas the regional models with small sample were limited to small area.

Key words: Chinese fir plantation; biomass; estimation model.

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国重要的速生用材树种. 目前, 杉木人工林面积已超过 9.215

$\times 10^6$ hm^2 , 约占我国人工林总面积的 28.54%^[1]. 生物量指标既可表明人工林的经营水平和开发利用价值, 又能反映人工林与其环境在物质循环和能量流动上的复杂关系, 特别是在评价人工林调节全球碳平衡和减缓大气中 CO_2 等温室气体浓度上升等方

* 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD24B03)资助.

** 通讯作者. E-mail: zhangjg@caf.ac.cn

2010-04-06 收稿, 2010-09-22 接受.

面具有不可替代的作用. 由于森林生物量的测定难度大, 而且耗时费力, 因此, 确定一种行之有效而又能准确测定森林生物量的方法具有重要意义. 生物量模型估算法是目前广泛采用的研究森林生物量的一种方法, 它是利用林木易测因子(如胸径和树高)来推算林木生物量, 从而减少野外工作量. 虽然在建模过程中, 需要测定一定数量的样本生物量数据, 但模型一旦建立, 就可以利用森林资源清查资料来估计同类林分的生物量, 而且有一定的精度保证. 特别是在大范围的森林生物量调查中, 利用生物量模型能大大减小调查工作量^[2]. 目前, 可采用的生物量模型众多^[3-6], 包括线性模型、幂函数模型、多项式模型和指数函数模型等, 模型中常用的自变量有胸径(D)、 D^2 、树高(H)、 DH 和 D^2H 等^[7-10].

对杉木林单木生物量模型优选时, 目前所筛选的模型种类和自变量数目均不多, 且多数研究仅局限于单个林龄^[11-12], 对整个杉木林生长过程中不同林龄生物量模型的研究较少, 且在估算方式上多采用分器官估算的方法. 如康冰等^[13]采用以 D^2H 为自变量的多项式模型, 对广西 13 年生杉木林单木的叶、枝、干、皮和根生物量进行估测; 邓秋香等^[14]采用以 D^2H 为自变量的多项式模型估算了广西大青山 12 年生杉木人工林的叶、枝、干、皮和根生物量, 其决定系数在 0.959 ~ 0.996, 相关系数 ≥ 0.979 . 目前, 对不同林龄杉木生物量的研究, 多针对不同林龄分别优选生物量模型, 未考虑模型的通用性^[6,15], 而对某一林龄的生物量最优模型是否适用于其他林龄及其预估精度如何、不同估算方法对生物量预测精度的影响、以及不同模型预测效果的差异及其相关影响因素等方面的研究鲜有报道. 因此, 本文基于福建和江西杉木幼龄林、中龄林和成熟林的生物量实测数据, 选择常用的 11 种生物量模型和 4 种自变量形式, 全面系统地对杉木不同林龄的单木各器官(叶、枝、干皮、去皮干、根莖和根)和全株生物量模型, 以及不分林龄的单木各器官和全株生物量模型分别进行优选, 并对最优生物量模型的预测效果进行了比较, 旨在为杉木人工林生物量的精确估算和碳储量的评价提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 调查样地自然概况

杉木生物量调查样地设置于福建卫闽林场和江西大岗山林区.

福建省邵武市卫闽林场(27°5' N, 117°43' E)

地处武夷山北段中山山脉东南侧山区, 为杉木的中心产区. 地貌主要为低山、高丘, 海拔 250 ~ 700 m, 坡度 25° ~ 35°. 该区属亚热带季风气候, 年均气温 17.7 °C, 1 月平均气温 6.8 °C, 7 月平均气温 28 °C, 极端低温 -7.9 °C, 年日照时数 1740.7 h, 年均霜期 95 d, 最长可达 132 d, 年均降水量 1768 mm, 年均相对湿度 82%. 土壤以发育在花岗岩等母质上的红壤为主, 土层较深厚, 腐殖质含量丰富.

江西省分宜县大岗山林区(27°30'—27°50' N, 114°30'—114°45' E)属罗霄山脉北端的武功山支脉. 该区属亚热带季风湿润气候, 年均温度 15.8 °C ~ 17.7 °C; 7 月平均温度 28.8 °C, 日最高温度 39.9 °C; 1 月平均温度 -5.3 °C, 日最低温度 -8.3 °C; 年均日照时数 1657 h, 最高 2047 h, 最低 1378 h, 日照百分率约 37%; 年均太阳总辐射 486.6 kJ · cm⁻²; 年均蒸发量 1503 mm, 最多 1771 mm, 最少 1274 mm; 年均降水量 1591 mm, 最多 2228 mm, 最少 1070 mm; 年均无霜期 265 d. 地带性土壤为低山丘陵红壤、黄壤及其亚类.

1.2 研究方法

2008 年 4 月, 在福建杉木幼龄林(7 年生, 密度 2500 株 · hm⁻²)、中龄林(16 年生, 密度 2500 株 · hm⁻²)和成熟林(28 年生, 密度分别为 1650、3300、4450、5033 和 5267 株 · hm⁻²)样地(每个林型为 1 个区组, 每个区组面积 20 m × 30 m, 共计 7 个区组)内进行每木检尺, 测量胸径和树高, 以确定林分胸径径阶(采用 2 cm 径阶距, 上限排外法)范围, 按照林分胸径径阶范围选取样木. 幼龄林最小径阶为 6 cm(即 5.0 ~ 6.9 cm), 最大径阶 16 cm(即 15.0 ~ 16.9 cm), 每个径阶采 1 ~ 2 株样木; 中龄林与成熟林的胸径径阶范围分别为 6 ~ 22 cm 和 8 ~ 28 cm, 选取方法与幼龄林相同. 共选取样木 39 株, 详情如表 1 所示. 伐倒样木, 采用“分层切割法”^[9-11]取样.

叶生物量的测定: 称量并记录每一伐倒木的鲜叶总质量, 然后收集树冠上、中、下不同部位的鲜叶样品共 0.5 ~ 1.0 kg, 准确称量并记录鲜叶样品质量. 枝的采样方法与叶相同. 带皮干的采样方法: 将幼龄林样木的树干由其基部至树梢按 1 m 长分为若干段, 分段称量, 记录带皮干的总鲜质量, 然后在每分段的树干基部取 5 cm 厚的圆盘, 作为带皮干样品, 并由树干基部至树梢将圆盘依次标号, 分别称量并记录圆盘鲜质量. 根和根莖的采样: 先将样木的根和根莖全部挖出, 去土, 分别称量并记录鲜根的总质量和鲜根莖的总质量, 然后分别取代表性的样品

0.5 ~ 1.0 kg,准确称量并分别记录鲜根和鲜根莖的样品质量. 将叶、枝、圆盘、根和根兜的鲜样品分别装入密封袋中,带回实验室烘干后称其干质量. 中龄林和成熟林样木生物量采样与幼龄林基本相同,仅分段长度不同,为 2 m.

2008 年 3 月,在江西杉木成熟林(28 年生,密度分别为 1500、1567、2883、2967、3200、4267、4383 和 5033 株·hm⁻²)样地(每个林型为 1 个区组,每个区组面积 20 m × 30 m,共计 8 个区组)内共选取样木 24 株(表 1). 样木选取方法和样品采集方法与福建生物量调查相同.

1.3 测定方法

将野外采集的各器官样品在烘箱中 105 ℃烘至恒量^[16],称其干质量,分别求各器官样品的干鲜质

量比,然后将各器官鲜质量换算成干质量,即为单木各器官的生物量,单木的全株生物量为各器官生物量之和.

1.4 数据处理

应用 SAS 9.0[®]软件拟合杉木单木各器官和全株的生物量模型,并进行拟合效果检验和预测精度检验. 本文选取 11 种常用的生物量模型(表 2),以福建的生物量数据进行模型拟合,通过平均精度(average accuracy, AA)对不同林龄各生物量最优模型进行预测效果检验(检验数据源见表 3), $AA = 1 - \sum (1 - \text{实际值} - \text{估计值}) / \text{实际值} / N_{\text{sample}} \times 100\%$, AA 值越接近 1,说明模型预测效果越好,一般 AA > 80%,即说明该模型比较符合实际^[17-18].

表 1 杉木人工林测定样木
Tab. 1 Sample trees of Chinese fir plantation

地 区 Region	林 龄 Stand age (a)	林分密度 Stand density (plant · hm ⁻²)	胸径 DBH (cm)	树高 Tree height (m)	地 区 Region	林 龄 Stand age (a)	林分密度 Stand density (plant · hm ⁻²)	胸径 DBH (cm)	树高 Tree height (m)
福建 Fujian	7	2500	5.7	4.9	福建 Fujian	28	5033	17.0	19.2
			5.9	5.0				19.5	17.0
			8.6	7.1				19.9	19.5
			9.2	6.8				21.9	18.2
			11.8	7.5				22.8	21.1
			12.8	7.2				26.5	22.7
			13.1	8.6				27.8	20.2
			15.3	9.3	江西 Jiangxi	28	4383	7.5	10.2
			16.3	9.2				8.0	11.8
			5.6	5.9				9.4	13.5
			8.7	9.3				9.5	13.1
			9.0	9.3				11.1	12.8
			9.9	9.2				11.4	14.5
			10.4	9.2				13.5	13.4
			11.2	9.8				1500	14.6
			12.6	11.5				1567	15.4
			14.8	12.3				1567	16.0
			16.6	13.2				1567	17.2
			18.0	14.0				1567	17.2
			18.2	14.3				1567	17.2
			20.6	13.9				1567	17.2
			20.6	14.0				1567	17.2
			22.5	14.8				1567	17.2
	16	2500	5.6	5.9				1567	17.2
			8.7	9.3				1567	17.2
			9.0	9.3				1567	17.2
			9.9	9.2				1567	17.2
			10.4	9.2				1567	17.2
			11.2	9.8				1567	17.2
			12.6	11.5				1567	17.2
			14.8	12.3				1567	17.2
			16.6	13.2				1567	17.2
			18.0	14.0				1567	17.2
			18.2	14.3				1567	17.2
			20.6	13.9				1567	17.2
			20.6	14.0				1567	17.2
	28	5033	8.7	10.3				1567	17.2
			9.1	12.2				1567	17.2
			10.5	13.2				1567	17.2
			12.5	14.3				1567	17.2
			12.7	16.4				1567	17.2
			13.7	17.8				1567	17.2
			14.8	16.5				1567	17.2
			15.7	18.0				1567	17.2
			16.6	16.6				1567	17.2
			16.6	16.6				1567	17.2
			16.6	16.6				1567	17.2
			16.6	16.6				1567	17.2

表 2 11 种常用生物量模型
Tab.2 11 kinds of commonly used biomass models

模型类型 Model type	模 型 Model	自变量 Independent variable
幂函数	$W=aD^b$	D
Power function	$W=a(DH)^b$	DH
	$W=a(D^2H)^b$	D^2H
多项式	$W=a+bD+cD^2$	D
Polynomial	$W=a+bD^2+cD^4$	D^2
	$W=a+bDH+c(DH)^2$	DH
	$W=a+bD^2H+c(D^2H)^2$	D^2H
指数函数	$W=ae^{bD}$	D
Exponential function	$W=ae^{bD^2}$	D^2
	$W=ae^{bDH}$	DH
	$W=ae^{bD^2H}$	D^2H

D:胸径 Diameter at breast height; H:树高 Tree height; W:生物量 Biomass. 下同 The same below.

2 结果与分析

2.1 不同林龄杉木人工林各生物量指标模型的拟合和优选

以福建杉木实测生物量为因变量, D 、 D^2 、 DH 和 D^2H 为自变量,采用 11 种数学模型进行回归拟合,共得到杉木幼龄林、中龄林和成熟林单木各器官(样本数分别为 9、14 和 16)和全株(样本数分别为 9、14 和 16)生物量估算模型 231 个,以决定系数(R^2)和残差平方和(SSR)作为模型拟合效果评价指标.结果表明,231 个生物量模型的 R^2 在 0.751 ~ 0.994,SSR 在 0.010 ~ 3419.383, F 检验达到极显著水平($P<0.01$),表明杉木单木各生物量主要受 D 、 D^2 、 DH 或 D^2H 的影响,但不同模型拟合效果的差异很大,其中,幂函数模型的 R^2 在 0.751 ~ 0.993,SSR 在 0.010 ~ 0.605,多项式模型的 R^2 在 0.763 ~ 0.994,SSR 在 0.765 ~ 3419.383,指数模型的 R^2 在 0.691 ~ 0.959,SSR 在 0.240 ~ 6.113.说明幂函数模型的拟合效果最优,其次为指数模型,最后为多项式模型.

表 3 生物量模型的检验数据源
Tab.3 Data sources for testing biomass models

最优生物量模型 Optimal biomass model	所建模型对福建单木的预测 Prediction of models established by this research on single-tree in Fujian	所建模型对江西单木的预测 Prediction of models established by this research on single-tree in Jiangxi	所建模型与文献模型预测效果的比较 Comparison between predictive effect of models established in this research and that in references
幼龄林 Young plantation	中龄林和成熟林 Mature and middle-aged plantation	成熟林 Mature plantation	江西成熟林 Mature plantation in Jiangxi
中龄林 Middle-aged plantation	幼龄林和成熟林 Mature and young plantation	成熟林 Mature plantation	江西成熟林 Mature plantation in Jiangxi
成熟林 Mature plantation	幼龄林和中龄林 Middle-aged and young plantation	成熟林 Mature plantation	江西成熟林 Mature plantation in Jiangxi
不分林龄 Mixed-age plantation	—	成熟林 Mature plantation	江西成熟林 Mature plantation in Jiangxi

综合比较,选出杉木单木各器官和全株生物量最优模型 21 个(R^2 在 0.802 ~ 0.991,SSR 在 0.010 ~ 0.520).从表 4 可以看出,杉木生物量最优模型均为幂函数模型,其中,生物量最优模型以 D 为自变量的模型数占总模型数的 48%,包括幼龄林的 3 个生物量最优模型(枝、干皮和去皮干)、中龄林的 5 个生物量最优模型(叶、枝、根莖、根和全株)和成熟林的 2 个生物量最优模型(枝和根兜);生物量最优模型以 DH 为自变量的模型数占总模型数的 43%,包括幼龄林的 2 个生物量最优模型(叶和根莖)、中龄林的 2 个生物量最优模型(干皮和去皮干)和成熟林的 5 个生物量最优模型(叶、干皮、去皮干、根和全株);幼龄林的根和全株生物量最优模型均为以 D^2H 为自变量的幂函数模型,占总模型数的 9%.

2.1.1 不同林龄杉木人工林最优模型拟合效果的比较 杉木幼龄林单木各器官和全株生物量最优模型的 R^2 在 0.893 ~ 0.991,SSR 在 0.010 ~ 0.192.其中,幼龄林单木叶和根莖的生物量最优模型形式为 $W=a(DH)^b$, R^2 分别为 0.949 和 0.915,SSR 分别为 0.065 和 0.097,说明杉木幼龄林单木叶和根莖的生物量主要受干形综合作用(DH)的影响,且叶生物量模型的拟合效果优于根莖;枝、干皮和去皮干的生物量最优模型形式为 $W=aD^b$,说明杉木幼龄林单木枝、干皮和去皮干的生物量主要受 D 的影响,且拟合效果为去皮干最优,其次为干皮,枝生物量模型的拟合效果稍差;根和全株的生物量最优模型形式为 $W=a(D^2H)^b$, R^2 分别为 0.893 和 0.991,SSR 分别为 0.192 和 0.010,表明杉木幼龄林单木根和全株的生物量主要受干形综合作用(D^2H)影响,全株生物量模型的拟合效果优于根.

杉木中龄林单木各器官和全株生物量最优模型

表 4 不同林龄杉木人工林单木生物量估算优选模型
Tab.4 Biomass optimal models for individual trees of Chinese fir plantations with different ages

林龄 Stand age	器官 Organ	拟合方程 Fitting equation	决定系数 R^2	残差平方和 Sum of squared residuals
7 ($n=9$)	叶 Leaf	$W=0.0075(DH)^{1.4367}$	0.949 **	0.0646
	枝 Branch	$W=0.0210D^{2.0887}$	0.954 **	0.0473
	干皮 Bark	$W=0.0175D^{2.0489}$	0.976 **	0.0231
	去皮干 Stem without bark	$W=0.0617D^{2.1387}$	0.986 **	0.0145
	根莖 Root head	$W=0.0078(DH)^{1.3408}$	0.915 **	0.0967
	根 Root	$W=0.0022(D^2H)^{1.0256}$	0.893 **	0.1922
	全株 Total single-tree	$W=0.0811(D^2H)^{0.8472}$	0.991 **	0.0102
16 ($n=14$)	叶 Leaf	$W=0.0039D^{2.4457}$	0.853 **	0.4216
	枝 Branch	$W=0.0070D^{2.1335}$	0.802 **	0.4607
	干皮 Bark	$W=0.0074(DH)^{1.3056}$	0.986 **	0.0276
	去皮干 Stem without bark	$W=0.0355(DH)^{1.2782}$	0.990 **	0.0187
	根莖 Root head	$W=0.0183D^{2.1759}$	0.931 **	0.1448
	根 Root	$W=0.0068D^{2.3082}$	0.817 **	0.4887
	全株 Total single-tree	$W=0.1606D^{2.1203}$	0.988 **	0.0219
28 ($n=16$)	叶 Leaf	$W=0.00003(DH)^{2.0425}$	0.918 **	0.3235
	枝 Branch	$W=0.000043D^{3.9652}$	0.915 **	0.5205
	干皮 Bark	$W=0.0013(DH)^{1.5571}$	0.958 **	0.0926
	去皮干 Stem without bark	$W=0.0225(DH)^{1.3685}$	0.987 **	0.0220
	根莖 Root head	$W=0.0063D^{2.5901}$	0.899 **	0.2686
	根 Root	$W=0.0006(DH)^{1.5840}$	0.952 **	0.1091
	全株 Total single-tree	$W=0.0173(DH)^{1.4964}$	0.984 **	0.0326

* * $P<0.01$.

的 R^2 在 0.802 ~ 0.990, SSR 在 0.019 ~ 0.489. 其中, 中龄林叶、枝、根莖、根和全株的生物量最优模型形式为 $W=aD^b$, 说明杉木中龄林单木叶、枝、根莖、根和全株的生物量主要受 D 影响, 模型拟合效果优劣依次为全株>根莖>叶>枝>根; 干皮和去皮干的生物量最优模型形式为 $W=a(DH)^b$, R^2 分别为 0.986 和 0.990, SSR 分别为 0.028 和 0.019, 表明杉木中龄林单木干皮和去皮干的生物量主要受干形综合作用 (DH) 影响, 且去皮干的生物量模型拟合效果优于干皮.

杉木成熟林单木各器官和全株生物量最优模型的 R^2 在 0.899 ~ 0.987, SSR 在 0.022 ~ 0.520. 其中, 叶、干皮、去皮干、根和全株的生物量最优模型形式为 $W=a(DH)^b$, 说明杉木成熟林单木叶、干皮、去皮干、根和全株的生物量主要取决于干形综合作用 (DH), 模型拟合效果优劣依次为去皮干>全株>干皮>根>叶; 单木枝和根莖的生物量最优模型形式为 $W=aD^b$, R^2 分别为 0.915 和 0.899, SSR 分别为 0.520 和 0.269, 表明 D 是杉木成熟林单木根莖和枝生物量的主要影响因素, 且根莖生物量的拟合效果优于枝.

杉木幼龄林单木各器官和全株生物量的最优模型形式包括 $W=aD^b$ 、 $W=a(DH)^b$ 、 $W=a(D^2H)^b$, 中

龄林和成熟林最优模型包括 $W=aD^b$ 、 $W=a(DH)^b$. 幼龄林单木各器官生物量最优模型的拟合效果依次为: 全株>去皮干>干皮>枝>叶>根莖>根; 中龄林为: 去皮干>全株>干皮>根莖>叶>枝>根; 成熟林为: 去皮干>全株>干皮>根>根莖>叶>枝.

2.1.2 杉木人工林不同器官和全株生物量最优模型拟合效果的比较 杉木幼龄林和成熟林单木叶的生物量最优模型形式为 $W=a(DH)^b$, R^2 分别为 0.949 和 0.918, 表明幼龄林和成熟林的单木叶生物量主要受干形综合作用 (DH) 的影响. 杉木中龄林单木叶生物量的最优模型形式为 $W=aD^b$, R^2 为 0.853, 表明 D 是中龄林单木叶生物量的主要影响因素.

杉木幼龄林、中龄林和成熟林的单木枝生物量最优模型形式均为 $W=aD^b$, 其 R^2 分别为 0.954、0.802 和 0.915, SSR 分别为 0.047、0.461 和 0.520, 表明 D 是影响杉木单木枝生物量的主要因素.

杉木幼龄林单木干皮生物量的最优模型形式为 $W=aD^b$, 而中龄林和成熟林单木干皮生物量的最优模型形式为 $W=a(DH)^b$, 说明幼龄林单木干皮生物量主要受 D 的影响, 而中龄林和成熟林则主要受干形综合作用 (DH) 的影响. 杉木各林龄单木去皮干的生物量最优模型形式与相应的单木干皮相同.

杉木幼龄林、中龄林和成熟林单木根的生物量最优模型形式分别为模型 $W=a(D^2H)^b$ 、 $W=aD^b$ 和 $W=a(DH)^b$, 其 R^2 分别为 0.893、0.817 和 0.952, SSR 分别为 0.192、0.489 和 0.109, 表明杉木幼龄林、中龄林和成熟林单木根生物量分别受干形综合作用 (D^2H)、 D 和干形综合作用 (DH) 的影响, 幼龄林单木根的生物量最优模型为 $w=a(DH)^b$, 而中龄林和成熟林单木根的最优模型均为 $w=aD^b$.

杉木幼龄林、中龄林和成熟林全株生物量的最优模型形式与相同的单木根相同, 其 R^2 分别为 0.991、0.988 和 0.984, 表明杉木幼龄林、中龄林和成熟林全株生物量分别受 D^2H 、 D 和 DH 的影响. 杉木各林龄全株生物量最优模型的 SSR 在 0.010~0.033, 表明全株生物量最优模型的估算误差非常小.

杉木单木叶生物量最优模型在不同林龄间的拟合效果优劣依次为: 幼龄林>成熟林>中龄林; 枝、干皮、去皮干、根莖和全株生物量拟合效果优劣顺序为: 幼龄林>中龄林>成熟林; 根生物量拟合效果优劣顺序为: 成熟林>幼龄林>中龄林.

2.2 不分林龄杉木人工林各器官和全株生物量模型的拟合和优选

以 39 株福建杉木人工林单木的实测生物量为因变量, D 、 D^2 、 DH 和 D^2H 为自变量, 采用 11 种数学模型进行回归拟合, 共得到不分林龄的杉木单木各器官和全株生物量估算模型 77 个 ($n=39$). 结果表明, 77 个不同生物量模型的 R^2 在 0.394~0.994, SSR 在 0.073~8624.905, F 检验达到极显著水平 ($P<0.01$), 其中, 幂函数模型的 R^2 在 0.394~0.990、SSR 在 0.073~5.606, 多项式模型的 R^2 在 0.437~0.994、SSR 在 67.730~8624.905, 指数模型的 R^2 在 0.410~0.929、SSR 在 2.490~26.018. 说明幂函数模型的拟合效果最优, 其次为指数模型, 多项式模型的拟合效果相对较差. 这与不同林龄杉木人工林各器官和全株生物量模型的拟合效果表现出相同规律.

综合分析, 共选出不分林龄的杉木单木各生物量最优模型 7 个 (R^2 在 0.624~0.990, SSR 在 0.074~3.533). 从表 5 可以看出, 杉木人工林各器官生物量的最优模型均为幂函数模型, 其中, 叶、枝、根莖和根的生物量最优估算模型形式为 $W=aD^b$, 模型拟合效果顺序为根莖>根>叶>枝; 去皮干的生物量最优估算模型形式为 $W=a(DH)^b$, R^2 为 0.990, SSR 为 0.074, 估算误差较小; 干皮和全株生物

表 5 不分林龄的杉木人工林单木生物量估算优选模型
Tab.5 Biomass optimal models for individual tree of Chinese fir plantations regardless of ages ($n=39$)

器官 Organ	拟合方程 Fitting equation	决定系数 R^2	残差平方和 Sum of squared residuals
叶 Leaf	$W=0.0115D^{2.0823}$	0.624 **	3.1280
枝 Branch	$W=0.0059D^{2.2800}$	0.638 **	3.5333
干皮 Bark	$W=0.0089(D^2H)^{0.8226}$	0.965 **	0.2463
去皮干 Stem without bark	$W=0.0320(DH)^{1.3050}$	0.990 **	0.0737
根莖 Root head	$W=0.0104D^{2.3901}$	0.920 **	0.5922
根 Root	$W=0.0073D^{2.3125}$	0.866 **	0.9954
全株 Total single-tree	$W=0.0930(D^2H)^{0.8030}$	0.976 **	0.1596

** $P<0.01$.

量的最优估算模型形式为 $W=a(D^2H)^b$, 全株生物量的拟合效果优于干皮.

以往研究表明, 不同类型模型对单木生物量的拟合效果均以幂函数最优^[19-23]. 本文的拟合结果也证明, 利用幂函数拟合杉木单木生物量的结果优于其他两类函数, 且生物量模型的自变量主要与植物的自身形态关系密切^[24-25]. 有研究者认为, D (或地径) 是建立单木器官生物量模型的最佳自变量, 增加 H 为自变量并不能使方程的 R^2 升高^[26-27]. 但也有研究显示, D^2H 与单木器官生物量的相关性最好^[28-29]. 因此, 树种、林龄或器官不同, 模型所采用的自变量可能不同, 如本文所建杉木生物量最优模型的自变量在不同林龄和器官间有所差异.

2.3 杉木人工林最优生物量模型的通用性比较

2.3.1 所建模型对福建不同林龄杉木单木各生物量预测效果的比较 由表 6 可见, 用本文所建的杉木单木各器官和全株生物量最优模型对福建不同林龄单木各生物量进行预测, 结果表明, 幼龄林各生物量最优模型对中龄林和成熟林直接预测的平均精度 (AA) 均低于 80%; 分器官预测中龄林和成熟林全株生物量的 AA 分别为 80.38% 和 85.35%, 比全株生物量最优模型的预测精度 (69.13% 和 68.84%) 高. 可见, 杉木幼龄林生物量最优模型无法直接对中龄林和成熟林各器官和全株生物量进行精确预测, 但可分器官精确预测中龄林和成熟林全株生物量.

杉木中龄林生物量最优模型对幼龄林的干皮、去皮干和全株以及成熟林的去皮干和全株 (分器官估算) 生物量预测的 AA 分别为 88.47%、91.08%、94.01%、90.65% 和 88.45%, 表明杉木中龄林生物量最优模型可精确预测幼龄林的干皮、去皮干和全株以及成熟林的去皮干和全株生物量. 杉木中龄林

表 6 杉木人工林各器官和全株生物量最优模型的预测效果

Tab.6 Predictive effect of optimal models for estimating organs' and total single-tree's biomass of Chinese fir plantation

林龄 Stand age (a)	采样地 Sampling site	器官 Organ	拟合方程 Fitting equation	福建单木 Single-tree in Fujian				江西单木 Single-tree in Jiangxi	
				林龄 Stand age (a)	平均精度 Average accuracy (%)	林龄 Stand age (a)	平均精度 Average accuracy (%)	林龄 Stand age (a)	平均精度 Average accuracy (%)
7	福建 Fujian	叶 Leaf	$W=0.0075(DH)^{1.4367}$	16	-306.09	28	-804.26	28	-898.10
		枝 Branch	$W=0.0210D^{2.0887}$		-90.77		-176.68		-159.60
		干皮 Bark	$W=0.0175D^{2.0489}$		70.32		63.78		71.03
		去皮干 Stem without bark	$W=0.0617D^{2.1387}$		73.86		49.25		52.54
		根莖 Root head	$W=0.0078(DH)^{1.3408}$		62.96		16.31		-6.98
		根 Root	$W=0.0022(D^2H)^{1.0256}$		-23.17		-81.62		-83.00
		全株 Total single-tree	$W=0.0811(D^2H)^{0.8472}$		69.13		68.84		63.60
		全株 Total single-tree	分器官 Sum of organs		80.38		85.35		79.91
16	福建 Fujian	叶 Leaf	$W=0.0039D^{2.4457}$	7	33.68	28	43.07	28	16.31
		枝 Branch	$W=0.0070D^{2.1335}$		37.51		19.33		24.04
		干皮 Bark	$W=0.0074(DH)^{1.3056}$		88.47		57.12		59.72
		去皮干 Stem without bark	$W=0.0355(DH)^{1.2782}$		91.08		90.65		85.29
		根莖 Root head	$W=0.0183D^{2.1759}$		72.78		74.45		64.41
		根 Root	$W=0.0068D^{2.3082}$		72.10		78.15		80.35
		全株 Total single-tree	$W=0.1606D^{2.1203}$		94.01		76.83		82.98
		全株 Total single-tree	分器官 Sum of organs		77.69		88.45		85.37
28	福建 Fujian	叶 Leaf	$W=0.00003(DH)^{2.0425}$	7	5.83	16	42.63	28	44.43
		枝 Branch	$W=0.000043D^{3.9652}$		20.19		55.03		59.63
		干皮 Bark	$W=0.0013(DH)^{1.5571}$		51.16		63.18		83.29
		去皮干 Stem without bark	$W=0.0225(DH)^{1.3685}$		88.20		91.40		89.97
		带皮干 Stem	分器官 Sum of organs		81.87		91.46		91.63
		根莖 Root head	$W=0.0063D^{2.5901}$		71.47		80.33		61.93
		根 Root	$W=0.0006(DH)^{1.5840}$		28.59		64.73		82.91
		地下部分 Underground	分器官 Sum of organs		49.72		75.82		79.55
		全株 Total single-tree	$W=0.0173(DH)^{1.4964}$		48.31		80.57		91.09
		全株 Total single-tree	分器官 Sum of organs		58.82		86.81		91.14
7,16,28	福建 Fujian	叶 Leaf	$W=0.0115D^{2.0823}$	-	-	-	-	28	4.54
		枝 Branch	$W=0.0059D^{2.2800}$		-		-		12.13
		干皮 Bark	$W=0.0089(D^2H)^{0.8226}$		-		-		82.33
		去皮干 Stem without bark	$W=0.0320(DH)^{1.3050}$		-		-		87.01
		带皮干 Stem	分器官 Sum of organs		-		-		89.89
		根莖 Root head	$W=0.0104D^{2.3901}$		-		-		65.74
		根 Root	$W=0.0073D^{2.3125}$		-		-		77.89
		地下部分 Underground	分器官 Sum of organs		-		-		76.90
		全株 Total single-tree	$W=0.0930(D^2H)^{0.8030}$		-		-		84.39
		全株 Total single-tree	分器官 Sum of organs		-		-		86.73
23	江西 ^[6, 30] Jiangxi	叶 Leaf	$W=0.000747(D^2H)^{0.999921}$	-	-	-	-	28	33.16
		枝 Branch	$W=0.000949(D^2H)^{0.999958}$		-		-		-0.63
		干皮 Bark	$W=0.001661(D^2H)^{1.000003}$		-		-		79.78
		去皮干 Stem without bark	$W=0.010254(D^2H)^{0.999885}$		-		-		89.55
		带皮干 Stem	分器官 Sum of organs		-		-		88.64
31	湖南 ^[12] Hunan	叶 Leaf	$W=0.000001572778(D^2H)^{1.703205}$	-	-	-	-	28	9.24
		枝 Branch	$W=0.0000002667972(D^2H)^{2.030493}$		-		-		-169.75
		干皮 Bark	$W=0.007748683(D^2H)^{0.8740341}$		-		-		44.62
		去皮干 Stem without bark	$W=0.006869125(D^2H)^{1.080237}$		-		-		65.39
		带皮干 Stem	分器官 Sum of organs		-		-		63.51
		地下部分 Underground	$W=0.03359604(D^2H)^{0.7073087}$		-		-		62.84
8,12, 16,20	福建 ^[31] Fujian	全株 Total single-tree	分器官 Sum of organs	-	-	-	-	28	58.31
		叶 Leaf	$W=0.1354D^{2.9235}H^{-1.6995}$		-		-		-17.59
		枝 Branch	$W=0.0226D^{3.1427}H^{-1.2466}$		-		-		-16.15
		带皮干 Stem	$W=0.0407D^{1.5228}H^{1.0703}$		-		-		91.14
		地下部分 Underground	$W=0.8911+0.1327D+0.0423D^2$		-		-		49.31
		全株 Total single-tree	分器官 Sum of organs		-		-		82.88

全株生物量最优模型对幼龄林的预测效果优于分器官的预测效果,而对成熟林单木全株生物量的预测效果则为分器官预测优于全株生物量最优模型。

杉木成熟林生物量最优模型可对福建幼龄林的去皮干 (AA = 88.20%) 和中龄林的去皮干 (AA = 91.40%)、根莖 (AA = 80.33%)、全株 (直接预测和分器官估算的 AA 分别为 80.57% 和 86.81%) 生物量进行精确预测,而且对幼龄林和中龄林全株生物量分器官预测的效果优于成熟林全株生物量最优模型的直接预测效果。

综上,杉木中龄林模型对福建幼龄林杉木单木各器官生物量预测的综合效果优于成熟林模型;成熟林模型对中龄林预测的综合效果优于幼龄林模型;中龄林模型预测成熟林的综合效果优于幼龄林模型。不同方法预测全株生物量时,仅中龄林全株生物量模型预测幼龄林全株生物量的预测效果优于分器官预测,其余均为分器官预测效果优于全株生物量模型的直接预测效果。

2.3.2 所建模型对江西成熟林杉木单木各生物量预测效果的比较 由表 6 可见,本文用所建的福建杉木单木各器官和全株生物量最优模型对江西成熟林单木各生物量进行预测,结果表明,幼龄林最优模型对江西成熟林各生物量预测的 AA 均低于 80%,其中,对成熟林单木全株生物量分器官预测的 AA 为 79.91%,比幼龄林全株生物量最优模型预测的 AA (63.60%) 高。表明杉木幼龄林生物量最优模型无法精确预测成熟林各生物量,但分器官预测成熟林单木全株生物量的效果优于全株生物量最优模型的直接预测效果。

杉木中龄林生物量最优模型对江西成熟林去皮干和根生物量预测的 AA 分别为 85.29% 和 80.35%,全株生物量直接预测和分器官估算的 AA 分别为 82.98% 和 85.37%。表明中龄林生物量最优模型可精确预测成熟林去皮干、根和全株生物量,且分器官预测成熟林单木全株生物量的效果优于全株生物量最优模型的直接预测效果。

杉木成熟林生物量最优模型可对江西成熟林的去皮干 (AA = 83.29%)、去皮干 (AA = 89.97%)、根 (AA = 82.91%) 和全株 (直接预测和分器官估算的 AA 分别为 91.09% 和 91.14%) 生物量进行精确预测。预测全株生物量时,成熟林最优生物量模型分器官的预测效果优于全株生物量最优模型。

不分林龄的生物量最优模型对江西成熟林干皮和去皮干生物量进行预测的 AA 分别为 82.33% 和 87.01%,全株生物量直接预测和分器官估算的 AA

分别为 84.39% 和 86.73%。分器官预测杉木成熟林单木全株生物量的效果优于全株生物量最优模型的直接预测效果。

杉木幼龄林、中龄林、成熟林和不分林龄的各器官和全株生物量最优模型对江西成熟林单木各生物量预测的综合效果优劣依次为:成熟林模型>不分林龄的模型>中龄林模型>幼龄林模型。预测全株生物量时,分器官的预测效果优于全株生物量最优模型的直接预测效果。

2.3.3 所建模型和文献模型对江西成熟林杉木单木各生物量预测效果的比较 由表 6 可见,本文用文献[6,12,30-31]中模型对江西杉木成熟林单木生物量进行预测。结果表明,江西 23 年生杉木成熟林单木生物量模型[6,30]对江西杉木成熟林单木叶、枝、干皮和去皮干生物量预测的 AA 分别为 33.16%、-0.63%、79.78% 和 89.55%,说明文献[6,30]中的模型仅能对江西杉木成熟林单木去皮干生物量进行精确预测,而且对江西杉木成熟林叶、枝、干皮和去皮干生物量预测的 AA 均低于本文所建成熟林单木生物量最优模型 (AA 分别为 44.43%、59.63%、83.29% 和 89.97%)。与本文所建的不分林龄的生物量最优模型相比,文献[6,30]模型对叶和去皮干预测的 AA 较高,对枝和干皮预测的 AA 较低。

湖南 31 年生杉木成熟林单木生物量模型^[12]无法精确预测江西杉木成熟林单木叶、枝、干皮、去皮干和地下部分生物量,其 AA 分别为 9.24%、-169.75%、44.62%、65.39% 和 62.84%,均低于本文所建的成熟林单木生物量最优模型的平均预测精度 (地下部分生物量 AA 为 79.55%,由根莖和根生物量估算求和所得),除叶外,该模型预测的 AA 均低于本文所建的不分林龄的生物量最优模型的平均预测精度 (地下部分生物量 AA 为 76.90%,由根莖和根估算求和所得)。

福建不分林龄的杉木林单木生物量模型^[31]对江西杉木成熟林单木叶、枝、带皮干、地下部分和全株 (分器官) 生物量预测的 AA 分别为 -17.59%、-16.15%、91.14%、49.31% 和 82.88%,表明文献^[31]模型可精确预测杉木成熟林的带皮干和全株生物量。文献^[31]模型对江西杉木成熟林叶、枝、地下部分和全株 (分器官) 生物量预测的 AA 均低于本文所建杉木成熟林和不分林龄的单木生物量最优模型,对成熟林带皮干生物量的预测精度高于本文所建的不分林龄的单木生物量最优模型 (AA = 89.89%,由干皮和去皮干估算求和所得),但低于

表 7 杉木生物量最优模型相关信息的比较
Tab.7 Comparison of relevant information about biomass optimal models of Chinese fir plantation

模型 Model	采样地 Sampling site	样本数 No. of samples	林龄 Stand age (a)	林分密度 Stand density (plant · hm ⁻²)	立地指数级 Site index class (m)	胸径范围 Diameter at breast height range (cm)	树高范围 Tree height range (m)
文献[6, 30]模型 Models in the reference ^[6, 30]	江西 Jiangxi	12	23	1460,1740, 1900,1980	14、16	—	—
文献[12]模型 Models in the reference ^[12]	湖南 Hunan	6	31	1560,1905, 2265	—	—	—
文献[31]模型 Models in the reference ^[31]	福建 Fujian	32	8,12, 16,20	2250	—	—	—
本文成熟林模型 Mature plantation models in this study	福建 Fujian	16	28	1650,3300,4450, 5033,5267	12,14,16, 18,20,22	8.7~27.8	10.3~20.2
本文不分林龄模型 Models of mixed-ages in this study	福建 Fujian	39	7,16,28	1650,2500,3300, 4450,5033,5267	12,14,16, 18,20,22	5.6~27.8	4.9~22.7
预测林木 Plantation to predict	江西 Jiangxi	24	28	1500,1567,2883, 2967,3200, 4267,4386,5033	12,14,16	7.5~30.2	10.2~23.2

—:相应信息在文献中没有详细说明 No corresponding information was elaborated in the references.

本文所建的成熟林单木生物量最优模型(AA = 91.63%,由干皮和去皮干估算求和所得)。

对江西杉木成熟林单木生物量而言,本文所建的成熟林最优生物量模型的预测效果优于文献[6, 12,30–31]模型。虽然文献[6,12,30–31]模型对江西杉木叶、去皮干和带皮干生物量的预测效果优于本文所建不分林龄的最优生物量模型,但对各生物量预测的综合效果不及本文所建不分林龄的最优生物量模型。模型预测效果的差异在一定程度上是由建模样木的选取所致。样木的采集地、数量、林龄、林分密度、立地条件、*D*和*H*的范围与预测林分越接近,模型越能真实反映预测林分的生长状况,预测效果越好。与文献[6,12,30–31]模型相比,本文建模的样本数较大(成熟林和不分林龄生物量最优模型的样本数分别为16和39),成熟林样木的林龄与江西成熟林的林龄相同,均为28年,且林分密度、立地条件、*D*和*H*的范围也基本涵盖了预测林木,样木的生长状况更接近预测林木(表7),因此,本文所建生物量模型比文献[6,12,30–31]模型能更好地预测江西杉木成熟林单木的各生物量。

3 讨 论

不同林龄杉木单木各生物量的主要影响因素不同。7年生杉木林(幼龄林)处于速生阶段,树高和胸径生长进入旺盛时期,形成郁闭林冠,出现自然整枝和林木分化,根系也充分发展,达到最大的深度和广度。本研究发现,树形(*DH*或*D²H*)是幼龄林杉木单木叶、根莖、根和全株生物量的主要影响因素,而枝、干皮和去皮干生物量主要受*D*的影响。16年生杉木林(中龄林)处于干材阶段,林分经过剧烈的自然整

枝,林冠层上升,被压木大量死亡淘汰,树高生长和直径生长逐渐缓慢下来,而材积生长则迅速增加,出现材积连年生长的高峰,根系仍不断分枝增长。中龄林杉木单木叶、枝、根莖、根和全株生物量主要取决于*D*,而干皮和去皮干主要受树形(*DH*)的影响。28年生杉木林(成熟林)树高生长下降,材积生长趋于平稳而达到数量成熟。成熟林杉木单木叶、干皮、去皮干、根和全株生物量主要决定于树形(*DH*),而枝和根莖主要受*D*的影响。不分林龄的杉木单木各器官生物量的主要影响因素与中龄林相似,这可能是由于与幼林龄和成熟林相比,中林龄各器官的生长速度处于相对均衡状态,在一定程度上消除了林龄对生物量的影响。比较发现,杉木单木枝生物量主要取决于*D*;干皮和去皮干生物量的主要影响因素相同;影响单木地上部分(叶和枝)生物量的主要因素也在一定程度上影响地下部分(根莖和根)和全株生物量。杉木各器官和全株生物量在其主要影响因素上所呈现的规律性,是由单木各器官的相互关系所决定,这种相互关系主要为各器官对有机物质和水肥吸收的相互依存和竞争关系,在地上部分(叶和枝)和地下部分(根莖和根)之间表现得尤为突出。

本研究在选取模型评价指标时,不仅包括常规的*R²*和SSR,还选用了预估的AA来综合评价模型的拟合效果、统计效果和预估准确性,可较全面地反映模型的优劣。通过预测效果检验发现,杉木幼龄林生物量最优模型不适用于不同林龄生物量的精确估测,无通用性;中龄林和成熟林的生物量最优模型仅能对不同林龄的去皮干生物量进行精确估测。不分林龄的杉木生物量最优模型可适用于干皮、去皮干

和全株生物量的精确估算. 可见, 建立在小样本基础上不同林龄杉木生物量最优模型的通用性较差, 而在大样本基础上建立的不分林龄杉木生物量最优模型则具有一定的通用性. 因此, 为了精确估算生物量, 并且便于计算, 建议采用不分林龄杉木生物量最优模型对不同林龄杉木单木生物量进行估算, 而且建模采样时要保证一定的样本数, 使采样数据符合正态分布.

对于杉木单木全株生物量的估算, 可用单木全株生物量最优模型直接估算, 也可用单木各器官生物量最优模型分器官估算求和的方法估算. 本研究发现, 对福建和江西杉木单木全株生物量预测效果, 多表现为分器官预测优于全株生物量最优模型直接预测, 目前, 对于不同林龄杉木单木全株生物量的估算大多采用分器官估算的方法^[32-34]. 对杉木碳储量的器官分配格局研究发现, 杉木各器官的碳含量存在差异^[35], 因此, 对不同林龄杉木单木全株生物量建议分器官估算.

杉木单木生物量因其林龄、林分密度和立地条件等存在一定差异. 虽然在建模样木的选取时, 尽可能涉及了不同林龄、不同林分密度和立地条件, 但不可能涵盖杉木的所有生境, 可能出现相同林龄杉木在不同生长环境下的生物量估算模型存在差异. 湖南会同 11 年生林分密度为 2175 株·hm⁻² 的杉木中龄林单木各器官(叶、枝、干皮、干和根)生物量估算模型, 均为以 D^2H 为自变量的幂函数^[36]; 同一地区以 11、14 和 16 年生不同林分密度(2750、3120 和 3550 株·hm⁻²)杉木生物量实测数据为基础, 所建中龄林各器官生物量估算模型, 则为以 D 或 D^2H 为自变量的幂函数^[37]; 广西大青山 13 年生杉木中龄林单木各器官生物量估算模型, 则为以 D^2H 为自变量的多项式函数^[13]. 本文建立的杉木中龄林和不分林龄的各器官生物量最优模型, 是以 D 、 DH 或 D^2H 为自变量的幂函数. 模型的选用将直接影响生物量的预测效果. 因此, 在研究区外应用本文所建杉木各生物量最优模型时需进一步验证, 对于 D 和 H 超过本文中的相应最大值时, 需进行变量外推并进一步验证.

参考文献

[1] Lei J-F (雷加富). Forest Resources in China. Beijing: China Forestry Press, 2005 (in Chinese)
 [2] Tang S-Z (唐守正), Zhang H-R (张会儒), Xu H (胥 辉). Study on establish and estimate method of compatible biomass model. *Scientia Silvae Sinicae* (林

业科学), 2000, **36**(suppl.): 19-27 (in Chinese)
 [3] Feng Z-W (冯宗炜), Chen C-Y (陈楚莹), Zhang J-W (张家武). Determination of biomass of *Pinus massoniana* stand in Huitong County, Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 1982, **18**(2): 127-134 (in Chinese)
 [4] Lü X-T (吕晓涛), Tang J-W (唐建维), He Y-C (何有才), et al. Biomass and its allocation in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(1): 11-22 (in Chinese)
 [5] Liu X-L (刘兴良), Liu S-R (刘世荣), Su Y-M (宿以明), et al. Aboveground biomass of *Quercus aquifolioides* shrub community and its responses to altitudinal gradients in Balangshan Mountain, Sichuan Province. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2006, **42**(2): 1-7 (in Chinese)
 [6] Tong J-Q (佟金权). Study on the biomass productivity and growth of Chinese fir plantations of different site and density. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University* (福建农林大学学报), 2008, **37**(4): 369-373 (in Chinese)
 [7] Wang W-F (王维枫), Lei Y-C (雷渊才), Wang X-F (王雪峰), et al. A review of forest biomass models. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2008, **23**(2): 58-63 (in Chinese)
 [8] Monsi M. Mathematical models of plant communities // Eckardt FE, ed. Functioning of Terrestrial Ecosystems at the Primary Production Level: Proceeding Copenhagen Symposium. Paris: UNESCO, 1968: 349-358
 [9] Fujimori T, Kawanabe S, Saito H, et al. Biomass and primary production in forests of three major vegetation zones of the northwestern United States. *Journal of Japan Forest Society*, 1976, **58**: 360-373
 [10] Feng Z-W (冯宗炜), Chen C-Y (陈楚莹), Zhang J-W (张家武), et al. Biological productivity of two forest communities in Huitong County of Hunan Province. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学丛刊), 1982, **6**(4): 257-267 (in Chinese)
 [11] Tian D-L (田大伦), Pan H-H (盘宏华), Kang W-X (康文星), et al. A study of the biomass of a second generation Chinese fir plantation. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 1998, **18**(3): 11-16 (in Chinese)
 [12] Zhao K (赵 坤), Tian D-L (田大伦). Study of the biomass and productivity of mature Chinese fir stand in Huitong County. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 2000, **20**(1): 7-13 (in Chinese)
 [13] Kang B (康 冰), Liu S-R (刘世荣), Cai D-X (蔡道雄), et al. Characteristics of biomass, carbon accumulation and its spatial distribution in *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem in low subtropical area. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2009, **45**(8): 147-153 (in Chinese)
 [14] Deng Q-X (邓秋香), Zhao Y (赵 瑛), Wu L-J (伍禄军), et al. Biomass productivity of a 12-year-old

- Cunninghamia lanceolata* plantation in Daqingshan of Guangxi. *Guangxi Forestry Science* (广西林业科学), 2008, **37**(4): 187–190 (in Chinese)
- [15] Duan A-G (段爱国), Zhang J-G (张建国), He C-Y (何彩云), *et al.* Study on the change laws of biomass of Chinese fir plantations. *Forest Research* (林业科学研究), 2005, **18**(2): 125–132 (in Chinese)
- [16] Lin S-M (林生明), Xu T-G (徐土根), Zhou G-M (周国模). Biomass of Chinese fir forest plantation. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 1991, **8**(3): 288–294 (in Chinese)
- [17] Hou L (侯琳), Lei R-D (雷瑞德). Carbon dioxide sequestration of main shrub species in a natural secondary *Pinus tabulaeform* forest at the Huoditang forest zone in the Qinling Mountains. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(11): 6077–6084 (in Chinese)
- [18] Li Y-Q (黎燕琼), Zheng S-W (郑绍伟), Su Y-M (宿以明), *et al.* Growth and allometric biomass equations of introduced *Agave americana* L. in upper reaches of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(9): 4820–4826 (in Chinese)
- [19] Xing Y-Q (邢艳秋), Wang L-H (王立海). Compatible biomass estimation models of natural forests in Changbai Mountains based on forest inventory. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(1): 1–8 (in Chinese)
- [20] Xu W-J (徐雯佳), Liu Q (刘琪), Ma Z-Q (马泽清), *et al.* A biomass of *Quercus fabri* population under different ecological restoration regimes in subtropical China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 459–466 (in Chinese)
- [21] Li X-R (李轩然), Liu Q-J (刘琪璟), Chen Y-R (陈永瑞), *et al.* Aboveground biomass of three conifers in Qianyanzhou plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(8): 1382–1388 (in Chinese)
- [22] Clough BF, Scott K. Allometric relationships for estimating aboveground biomass in six mangrove species. *Forest Ecology and Management*, 1989, **27**: 117–127
- [23] Zianis D, Mencuccini M. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 2004, **187**: 311–332
- [24] Paton D, Nuñez J, Bao D, *et al.* Forage biomass of 22 shrub species from Monfragüe Natural Park (SW Spain) assessed by log-log regression models. *Journal of Arid Environments*, 2002, **52**: 223–231
- [25] Zeng H-Q (曾慧卿), Liu Q (刘琪), Feng Z-W (冯宗炜), *et al.* Estimation models of under story shrub biomass and their applications in red soil hilly region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(10): 2185–2190 (in Chinese)
- [26] Alaback PB. Biomass regression equations for under story plants in coastal Alaska: Effects of species and sampling design on estimates. *Northwest Science*, 1986, **60**: 90–103
- [27] Ter-Mikaelian MT, Korzukhin MD. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 1997, **97**: 1–24
- [28] Brandeis TJ, Delaney M, Parresol BR, *et al.* Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. *Forest Ecology and Management*, 2006, **233**: 133–142
- [29] Vallet P, Dhote JF, Moguédec GL, *et al.* Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 2006, **229**: 98–110
- [30] Tong J-Q (佟金权). Study on Biomass Production and Generalized Stem Curve Model for Chinese fir Plantation. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 1999 (in Chinese)
- [31] Qian N-Z (钱能智), Ye J-Z (叶镜中). A study on the biomass of Chinese fir mixed genealogy stand. *Journal of Nanjing Forestry University* (南京林业大学学报), 1992, **16**(3): 19–24 (in Chinese)
- [32] Zheng H, Ouyang ZY, Xu WH, *et al.* Variation of carbon storage by different reforestation types in the hilly red soil region of southern China. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**: 1113–1121
- [33] Balboa-Murias MÁ, Rodríguez-Soalleiro R, Merino A, *et al.* Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. *Forest Ecology and Management*, 2006, **237**: 29–38
- [34] Retzlaff WA, Handest JA, Ó'Malley DM. Whole-tree biomass and carbon allocation of juvenile trees of loblolly pine (*Pinus taeda*): Influence of genetics and fertilization. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, **31**: 960–970
- [35] Tian D-L (田大伦), Fang X (方晰), Xiang W-H (项文化). Carbon density of the Chinese fir plantation ecosystem at Huitong, Hu'nan Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(11): 2382–2386 (in Chinese)
- [36] Li S-H (李淑花), Shi J-N (石军南), Wu M-Q (吴梅俏). Biomass and vertical distribution of the second-growth Chinese fir plantation. *Forest Engineering* (森林工程), 2007, **23**(1): 1–4 (in Chinese)
- [37] Kang W-X (康文星), Tian D-L (田大伦), Yan W-D (闫文德), *et al.* Solar energy storage and distribution in bole stage of Chinese fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2004, **40**(5): 205–209 (in Chinese)

作者简介 李燕,女,1981年生,博士。主要从事林木培育、森林土壤碳储量等研究,发表论文15篇。E-mail: fly-ingliyan@126.com

责任编辑 杨弘